



# اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب- مس در محفظه T شکل مورب

عباس کسائی پور<sup>1</sup>، بهزاد قاسمی<sup>2\*</sup>، افراسیاب رئیسی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
 \* شهرکرد، صندوق پستی 115، ghasemi@eng.sku.ac.ir

## چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه T شکل مورب پر شده از نانوسیال آب و مس تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت به روش عددی بررسی شده است. دیوار بالائی محفظه در دمای سرد و سایر دیوارها عایق می‌باشند. یک منبع حرارتی با دمای ثابت در کف محفظه تعبیه شده است. معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل به طور همزمان حل می‌گردد. عدد هارتمن از 0 تا 80 تغییر داده شده و محفظه تحت زوایای 0 تا 90 درجه چرخیده است. نتایج نشان می‌دهند، اثر میدان مغناطیسی بر نوسلت متوسط در ریلی‌های بالا بیشتر است. در  $Ra=10^5$ ، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن 20، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن 40 به بالا، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود. در  $Ra=10^6$ ، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن 20، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن 40 به بالا، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد، بیشترین انتقال حرارت در اعداد ریلی  $10^5$  و  $10^6$ ، در زاویه 67/5 درجه رخ می‌دهد و کمترین انتقال حرارت در اعداد ریلی  $10^5$  و  $10^6$ ، به ترتیب در زاویه صفر و 22/5 درجه رخ می‌دهد.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 27 اسفند 1392  
 پذیرش: 10 مهر 1393  
 ارائه در سایت: 12 مهر 1393  
 کلید واژگان:  
 میدان مغناطیسی  
 محفظه T شکل  
 نانوسیال  
 کسر حجمی نانوذرات  
 جابجایی آزاد

## Magnetic field effect on nanofluid water-cu natural convection in an inclined T shape cavity

Abbas kasaeipoor<sup>1</sup>, Behzad Ghasemi<sup>2\*</sup>, Afrasiab Raisi<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, shahrekord University, shahrekord, iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, shahrekord University, shahrekord, iran  
 3- Department of Mechanical Engineering, shahrekord University, shahrekord, iran  
 \* P.O.B. 115, Shahrekord, Iran, ghasemi@eng.sku.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 18 March 2014  
 Accepted 02 October 2014  
 Available Online 04 October 2014

Keywords:  
 Magnetic field  
 T shape cavity  
 Nanofluid  
 solid volume fraction  
 natural convection

## ABSTRACT

In this paper, the result of a numerical study on the natural convection in an inclined T shape cavity filled with Water-Cu nanofluid with the presence of a constant magnetic field was investigated. A heat source embedded on the bottom wall of enclosure, the upper wall is cold and the other walls are adiabatic. Discretization of the governing equations are achieved through a finite volume method and solved with SIMPLE algorithm. The Hartmann number has been varied from 0 to 80 and the cavity has been twisted under the angles between 0 to 90 degrees. The findings of study show that the effect magnetic field on the average Nusselt number is higher in high Reyleigh number. In  $Ra=10^5$ , the increase in nanofluid, to the Hartman number 20, contributes to decrease of the average number and in the Hartman number 40 and more, causes the average Nusselt number to increase. In  $Ra=10^6$ , the increase in nanofluid, to the Hartman number 20, contributes to increase of the average number and in the Hartman number 40 and more, causes the average Nusselt number to decrease. The results also indicate that, the maximum heat transfer, in  $Ra=10^5$  and  $Ra=10^6$  accurse at 67.5° angle. The minimum heat transfer, in  $Ra=10^5$  and  $Ra=10^6$  accurse at 0° and 22.5° angle respectively.

## 1- مقدمه

به صورت جابه‌جایی آزاد به خارج از دستگاه منتقل شود. از نمونه‌های بارز این‌گونه تجهیزات می‌توان به میکروپروسورها، آی‌سی‌ها و قطعات گرما ساز در کامپیوترهای قابل حمل، تجهیزات ارتباط از راه دور و بسیاری از تجهیزات الکترونیکی که در فضای محفظه دستگاه محبوس شده‌اند، اشاره کرد. از جمله کارهای دقیق اولیه در زمینه جابجایی آزاد می‌توان به

در دو دهه گذشته به علت کاربردهای فراوان محققان توجه زیادی به جابه‌جایی آزاد داشته‌اند. یکی از این کاربردها در خنک شدن تجهیزات الکترونیکی است. کنترل دمای قطعات داخلی این دستگاه‌ها از پارامترهای مهم در طراحی و ساخت آن‌هاست. گرمای تولید شده در این قطعات می‌تواند

Please cite this article using:

A. kasaeipoor, B. Ghasemi, A. Raisi, Magnetic field effect on nanofluid water-cu natural convection in an inclined T shape cavity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 179-189, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده می‌شوند. چنین سیالاتی پتانسیل زیادی برای افزایش نرخ انتقال حرارت از خود نشان می‌دهند. خصوصیات انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات به خواص ترموفیزیکی سیال پایه و ذرات معلق در آن، کسر حجمی ذرات معلق و شکل و ابعاد این ذرات بستگی دارد [12]. امین‌الساداتی و قاسمی [13] در پژوهشی جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مربعی با یک منبع حرارتی روی ضلع پایینی محفظه مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که افزودن نانوذرات به آب خالص در اعداد ریلی پایین، موجب افزایش قابل توجهی در انتقال حرارت آن می‌شود. محمودی و هاشمی [14] مطالعات عددی روی جریان جابجایی آزاد روی یک محفظه C شکل پر شده از نانوسیال آب و مس انجام دادند. آنها دریافتند که در اعداد ریلی پائین، اثر نانوذرات مس در افزایش انتقال حرارت بیشتر از اعداد ریلی بالاتر بود.

میدان‌های مغناطیسی در بسیاری از جریان‌های طبیعی و صنایع تأثیرگذار هستند. به شاخه‌ای از مطالعات که به اثر متقابل بین میدان مغناطیسی و سیال هادی در حال حرکت می‌پردازد، هیدرودینامیک مغناطیسی (MHD) می‌گویند. زو و همکارانش [15] یک مطالعه تجربی روی انتقال حرارت جابجایی آزاد با و بدون میدان مغناطیسی در درون محفظه‌ای مستطیل شکل انجام داده‌اند که حضور میدان مغناطیسی باعث توقف انتقال حرارت می‌شود. آنها همچنین نشان دادند زمانی که قدرت میدان مغناطیسی بالا و قدرت جابجایی پایین باشد، خطوط جریان در مرکز محفظه کشیده شده و خطوط دما ثابت تقریباً موازی می‌شود که نشان دهنده غالب شدن هدایت حرارتی در مرکز محفظه می‌باشد. رودریاه و همکارانش [16] تأثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت هم‌جهت با شتاب جاذبه بر جریان جابه‌جایی آزاد گذرا درون یک محفظه مربعی با دیواره‌های جانبی دما ثابت و دیواره‌های افقی عایق را بطور عددی بررسی نموده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، جریان جابجایی از بین رفته و نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. حامد و همکارانش [17] و گیویل و همکارانش [18] در کارهای تجربی تأثیر میدان بر انتقال حرارت روی صفحه عمودی را سنجیدند و نانوسیال‌های متفاوت با قطر ذرات گوناگون را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش میدان مغناطیسی باعث کاهش سرعت و شبیه شدن پروفیل سرعت و دمای نانوذرات متفاوت با یکدیگر می‌شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود که علی‌رغم بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد با سیال هوا در محفظه‌های T شکل، انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در این محفظه‌ها بررسی نشده است. علاوه بر آن اثر میدان مغناطیسی نیز در مطالعات فوق به چشم نمی‌خورد. نتایج حاصله از این مطالعه می‌تواند در طراحی حرارتی تجهیزات الکترونیک که بطور ناخواسته تحت میدان مغناطیسی با هر زاویه‌ای واقع شده‌اند، راه‌گشا باشد. به همین منظور، در این مقاله، به مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه T شکل مورب حاوی نانوسیال آب و مس پرداخته شده است. در این راستا تأثیر پارامترهایی هم‌چون عدد ریلی، عدد هارتمن، درصد حجمی نانوذرات و تغییر زاویه محفظه بر نرخ انتقال حرارت بررسی شده است.

## 2- بیان مسأله

مدل فیزیکی که در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد یک محفظه T شکل مورب مطابق شکل 1 است. این محفظه دو بعدی با طول و ارتفاع L می‌باشد. دیواره بالایی این محفظه در دمای سرد  $T_c$  است. در وسط و کف محفظه یک منبع حرارتی با ضخامت ناچیز در دمای گرم  $T_h$  قرار داشته و دیگر دیواره‌ها عایق می‌باشند.

بررسی‌های سایتو و هریس [1]، و دوهل دیویس [2]، اشاره نمود. این محققین جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای ثابت و متفاوت را به روش عددی حل نموده‌اند. همچنین ناکامورا و همکارانش [3] به بررسی اثر اختلاف دما در ایجاد حرکت‌های غوطه وری در سیال پرداخته‌اند. آنها در تحقیق خود با استفاده از تقریب بوزینسک و حل عددی معادلات ناویر استوکس تغییرات جریان سیال را پیش‌بینی نموده و نرخ انتقال حرارت از سیال که ناشی از جابجایی آزاد می‌باشد را بررسی نموده‌اند.

پیشرفت تکنولوژی و نیاز برای نصب قطعات الکترونیکی در فضای محدود محفظه سبب شده است که مسئله انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه‌های شکل‌دار مهم و ضروری تلقی گردد. به همین دلیل اخیراً توجه محققین به بررسی جابجایی آزاد در محفظه‌های با شکل‌های مختلف از جمله C شکل، U شکل و T شکل جلب شده است [4,5]. العلامی و همکارانش [6] مطالعات عددی روی اثر دودکشی محفظه T شکل با بلوک‌های هم‌دما انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که برای مقادیر نسبتاً بالای عدد ریلی، اثر ارتفاع بلوک در نرخ انتقال حرارت ناچیز است. مزرهاب و همکارانش [7] مطالعات عددی روی جریان جابجایی آزاد در یک محفظه T شکل انجام دادند. آنها تأثیر عدد ریلی و دمای دیواره‌های محفظه در انتقال حرارت و جریان هوا را بررسی کردند و دریافتند با افزایش عدد ریلی انتقال حرارت در محفظه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

همچنین مطالعات گوناگونی در زمینه جابجایی آزاد در محفظه‌های شیب‌دار گزارش شده است. این تحقیقات نشان داده‌اند که شیب محفظه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر حرکت‌های سیال و پارامترهای انتقال حرارت دارد. لاک و فو [8]، ثابت کرده‌اند که بیشترین انتقال حرارت در یک لوله مبدل حرارتی، را زمانی می‌توان بدست آورد که بطور بهینه شیب‌دار گردد. تسنیم و محمود [9] به بررسی عددی جریان جابه‌جایی آزاد در یک محفظه L شکل مورب پرداختند. نتایج این مطالعات نشان داده است که میزان انتقال حرارت برای محدوده مشخصی از اعداد ریلی با تغییرات زاویه ثابت می‌باشد. رحمان و شریف [10] مطالعات عددی بر جابجایی آزاد در محفظه‌های مستطیلی شیب‌دار با نسبت وجه‌های مختلف، انجام داده‌اند. ایشان دریافتند که در محفظه‌های مربعی با طول و عرض برابر در یک شیب مشخص، انتقال حرارت جابجایی دیواره‌های سرد و گرم بیشترین مقدار را دارد. این درحالی است که در محفظه‌های با نسبت طول به عرض زیاد، همواره با افزایش شیب، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. امین‌الساداتی و قاسمی [11] نیز، جابجایی آزاد در محفظه شیب‌داری که دو دیواره مجاور آن در دو دمای مختلف بود را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که تأثیر زاویه محفظه در اعداد ریلی کم، بر خطوط جریان و دما ناچیز می‌باشد و در اعداد ریلی بزرگ، جابجایی آزاد در محفظه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در تمامی اعداد ریلی، دمای متوسط محفظه با افزایش زاویه محفظه، تا یک مقدار ماکزیمم، افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. لیکن نرخ کاهش دما در اعداد ریلی بزرگ، مشهودتر است. ایشان همچنین نشان دادند که برای اعداد ریلی بزرگ، زاویه محفظه بهینه‌ای وجود دارد که نرخ انتقال حرارت را ماکزیمم می‌کند.

از آنجایی که چشم‌انداز نانوسیالات در سال‌های اخیر بسیار امیدوار کننده بوده و مطالعات زیادی در زمینه‌ی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات صورت گرفته است، لذا این انگیزه به وجود آمد که از نانوسیال در داخل محفظه استفاده شود. مفهوم نانوسیال، سوسپانسیون‌های حاوی ذرات نانو، مواد فلزی و غیرفلزی را شامل می‌شود که به عنوان محیط‌های انتقال حرارت

بر روی دیواره‌ها،  $U, V=0$  می‌باشد. شرط مرزی حرارتی نیز به این صورت می‌باشد که برای سطح منبع گرم  $\theta=1$ ، بر روی دیوار بالایی با دمای سرد  $\theta=0$  و بر روی دیواره‌های عایق نیز گرادیان دما برابر صفر است.

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است که عدد نوسلت موضعی روی منبع گرم به صورت رابطه (7) تعریف می‌شود:

$$Nu(X) = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (7)$$

عدد نوسلت متوسط نیز از طریق انتگرال گیری بر روی منبع گرم به صورت رابطه (8) دست می‌آید:

$$Nu_m = \frac{1}{L_0} \int_s Nu(X) dx \quad (8)$$

### 3-2- روابط مربوط به خواص نانوسیال

برای حل معادلات حاکم، احتیاج به خواص ترموفیزیکی نانوسیال می‌باشد. خواصی نظیر چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی، ضریب پخش حرارتی و ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال به کمک خواص سیال خالص و نانوذرات جامد به صورت روابط (9-13) محاسبه می‌شوند [19].

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad (9)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_s \quad (10)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s \quad (11)$$

$$\alpha_{nf} = k_{nf}/(\rho c_p)_{nf} \quad (12)$$

$$\sigma_{nf} = (1 - \varphi)\sigma_f + \varphi\sigma_s \quad (13)$$

در این روابط  $\varphi$  درصد حجمی نانوذرات است و اندیس‌های  $f$ ،  $s$  و  $nf$  به ترتیب اشاره به سیال خالص، نانوذرات و نانوسیال دارد.

برای مدل کردن ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال از رابطه بریکمن استفاده شده است [20]. طبق رابطه (14) داریم:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (14)$$

$K_{eff}$  ضریب هدایت گرمایی نانوسیال است که مدلی برای آن پیشنهاد شده است. برای دو جزء مستقل از ذرات کروی سوسپانسیون، مدل می‌دهد [21].

طبق رابطه (15) داریم:

$$k_{eff} = k_f \left[ 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (15)$$

که  $k_s$  و  $k_f$  به ترتیب ضریب هدایتی نانوذرات مس و سیال خالص می‌باشند. برای نانوسیال آب-مس،  $c=36000$  پیشنهاد شده است [22].

طبق رابطه (16) داریم:

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \varphi}{d_s (1 - \varphi)} \quad (16)$$

قطر نانوذرات جامد  $d_s=100$  nm است و اندازه مولکولی سیال مینا به صورت روابط (17، 18) می‌باشد:

$$d_f = 2 \text{ \AA} \quad (17)$$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (18)$$

که  $u_s$  حرکت براونی سرعت نانوذرات می‌باشد. طبق رابطه (19) داریم:

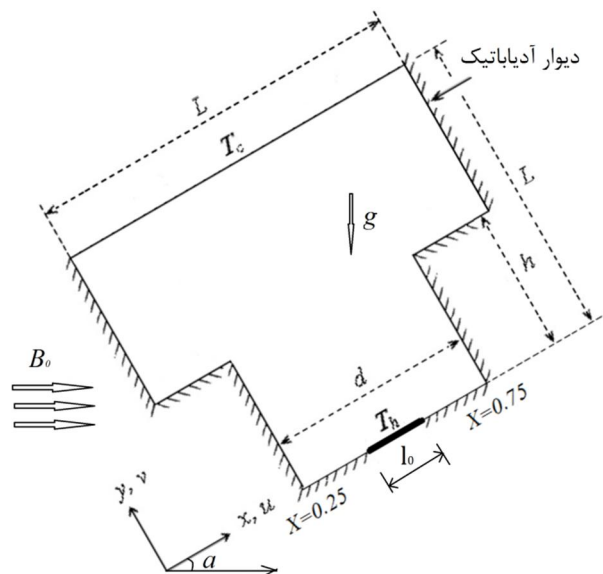
$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (19)$$

که  $k_b = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ثابت بولتزمن می‌باشد.

ویسکوزیته دینامیکی سیال خالص  $\mu_f = 9.09452 \times 10^{-4}$  و پرانتل آب خالص  $Pr=6.2$  است. خواص ترموفیزیکی آب و مس در جدول 1 آورده شده است.

### 4- شبیه سازی عددی

برای مدل کردن هندسه مورد نظر برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شد.



شکل 1 محفظه تحت میدان مغناطیسی.

نسبت طول منبع حرارتی به ضلع محفظه  $l_0/L=0.2$  می‌باشد. درون محفظه از نانوسیال آب و مس پر شده است. نیروی گرانش به سمت پایین و محفظه تحت میدان مغناطیسی ثابت  $B_0$  در جهت افقی قرار دارد.

### 3- معادلات اساسی حاکم

در این مطالعه فرض می‌کنیم جریان به صورت آرام و دائم بدون تولید و ذخیره انرژی بوده و اتلاف حرارت لزجی وجود نداشته باشد. همچنین نانوسیال را به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد در نظر می‌گیریم. نانوسیال به صورت سیال نیوتنی تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. همچنین از گرمایش ناشی از میدان مغناطیسی صرف‌نظر شده است. معادلات بدون بعد حاکم بر مسئله با اعمال تقریب بوزینسک به صورت روابط (1-4) خواهند بود [4]:

پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

مومنوم X و Y

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra.Pr.\theta.\sin\alpha - Ha^2.Pr.U.\sin\alpha \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra.Pr.\theta.\cos\alpha - Ha^2.Pr.V.\cos\alpha \quad (3)$$

انرژی

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (4)$$

متغیرهای بی بعد استفاده شده در معادلات به شکل روابط (5، 6) هستند:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, H = \frac{h}{L}, D = \frac{d}{L}, L_0 = \frac{l_0}{L}, P = \frac{\rho L^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (5)$$

اعداد بدون بعد ریلی، پرانتل و هارتمن نیز به صورت رابطه (6) تعریف می‌شوند:

$$Ra = \frac{g\beta L^3 (T_h - T_c)}{\nu_f \alpha_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\alpha_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f}} \quad (6)$$

### 3-1- شرایط مرزی

شرط مرزی هیدرودینامیکی مسأله حاضر شرط عدم لغزش و شرط عدم نفوذ

معادلات 1 تا 4 همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده شبکه بندی شده است. جهت حل هم زمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل، که جزئیات کامل آن در مرجع [23] آمده، استفاده شده است. با توجه به اینکه اساس الگوریتم حل بر روش تکرار استوار است، از معیار همگرایی رابطه (20) استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_i \sqrt{\left| \frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\varphi^{n+1}} \right|_{i,j}} \leq 10^{-7} \quad (20)$$

که  $n$  تعداد تکرار و  $\varphi$  متغیر عمومی  $(U, V, \theta)$  را نشان می‌دهد.

### 5- صحت سنجی

جهت بررسی صحت عملکرد کد نوشته شده، مقایسه ای بین نتایج بدست آمده با نتایج مراجع دیگر صورت گرفته است. ابتدا محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای مختلف  $T_c$  (سرد) و  $T_h$  (گرم) برای  $Pr=0.71$  و  $Ra=10^4, 10^5, 10^6$  محاسبه و در جدول 2 عدد نوسلت متوسط با نتایج موجود در مراجع مختلف مقایسه شده است. از مقایسه داده‌ها در جدول 2 مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده با دقت خوبی قابل قبول می‌باشد.

در مقایسه دیگر، عملکرد برنامه حاضر در مسایل نانوسیال کنترل شده است. در این بررسی، مقدار نوسلت متوسط در یک محفظه C شکل با سه دیوار داخلی در دمای سرد و سه دیوار خارجی در دمای گرم رسم شده است [14]. در این مقاله از نانوسیال آب- مس استفاده شده است. این مقایسه برای  $Ra=10^5$  در نسبت ابعادی  $(AR=L/H)$  و درصد نانوذرات مختلف انجام شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که اختلاف نتایج کار حاضر و مرجع [14] در حد قابل قبول است.

همچنین در شکل 3 مقایسه‌ای جهت بررسی کد نوشته شده تحت میدان مغناطیسی صورت گرفته است. در این شکل، نوسلت متوسط در یک محفظه مربعی شکل مورب با دو دیوار عایق و دو دیوار در دمای سرد و گرم [27] رسم شده است که محفظه تحت میدان مغناطیسی قرار دارد و سیال عامل هوا می‌باشد. این مقایسه برای  $Ra=10^5$  و اعداد هارتمن 50 و 70 در زوایای مختلف محفظه انجام شده است.

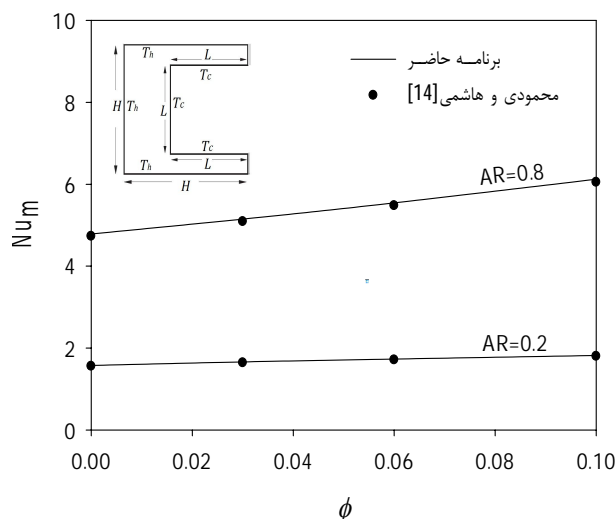
همان‌گونه که از نتایج مشاهده می‌شود عدد نوسلت متوسط به دست آمده از برنامه حاضر با نمونه کارهای انجام شده در زمینه انتقال حرارت جابجایی آزاد، نانوسیال و میدان مغناطیسی تطابق مناسبی دارد.

پس از کنترل عملکرد برنامه لازم است که استقلال جواب‌ها از تعداد نقاط شبکه بررسی شده و شبکه حل مناسب انتخاب شود. بدین منظور تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت منبع گرم مسئله حاضر در اعداد ریلی، اعداد هارتمن و درصد حجمی نانوذرات مختلف بررسی شد. نمونه ای از این بررسی‌ها به ازای  $\varphi=0.04$ ،  $Ra=10^5$ ،  $Ha=40$  در جدول 3 آورده شده است. در این جدول عدد نوسلت متوسط منبع گرم ارائه شده است. با توجه به این جدول، مشخص است که تقریباً برای شبکه‌های ریزتر از  $120 \times 120$  جواب‌ها یکسان مانده است. بدین ترتیب شبکه یکنواخت  $120 \times 120$  برای اجراهای برنامه انتخاب شده است.

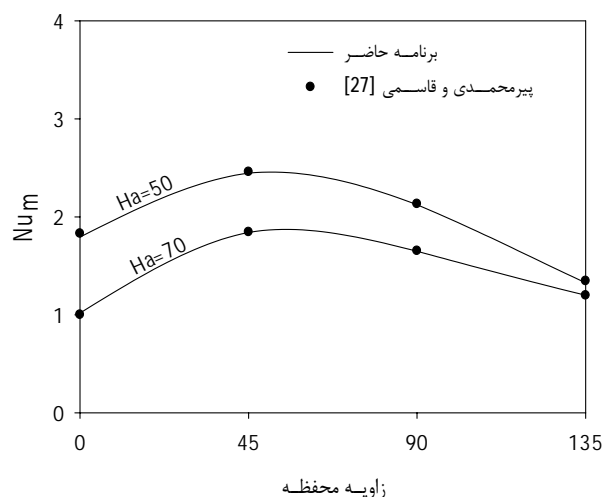
### 6- نتایج

#### 6-1- محفظه افقی $(\alpha=0^\circ)$

در این بخش از نتایج به بررسی اعداد ریلی و هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر روی میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت از محفظه افقی



شکل 2 مقایسه نوسلت متوسط برنامه حاضر با مرجع [14]



شکل 3 اعتبار سنجی برنامه حاضر با محفظه مربعی تحت میدان مغناطیسی با زاویه چرخش متفاوت [27].

جدول 1 خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات مس [19]

خواص ترموفیزیکی	نانو ذرات مس	آب خالص
$\rho$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	8933	997/1
$C_p$ ( $\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	385	4179
$k$ ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	401	0/613
$\beta$ ( $\text{K}^{-1}$ ) $\times 10^5$	1/67	21
$\sigma$ ( $\text{m}^{-1}$ ) $\times 10^7$	$5/96 \times 10^7$	0/05

جدول 2 اعتبارسنجی برنامه حاضر با محفظه مربعی شکل

Ra	$10^6$	$10^5$	$10^4$	
مسئله حاضر	8/850	4/522	2/246	
خانافر و همکاران [24]	8/829	4/522	2/245	
باراکوس و میتولیس [25]	8/806	4/510	2/245	
مارکاتوس و پریسلوس [26]	8/754	4/430	2/201	
دیویس [2]	8/719	4/519	2/243	

جدول 3 تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط منبع گرم در  $Ra=10^5$ ،  $\varphi=0.04$ ،  $Ha=40$ ،  $\alpha=0^\circ$

شبکه	$140 \times 140$	$120 \times 120$	$100 \times 100$	$80 \times 80$	$60 \times 60$
$Nu_m$	2/875	2/876	2/889	2/916	2/957

$(\alpha=0^\circ)$  می‌پردازیم.

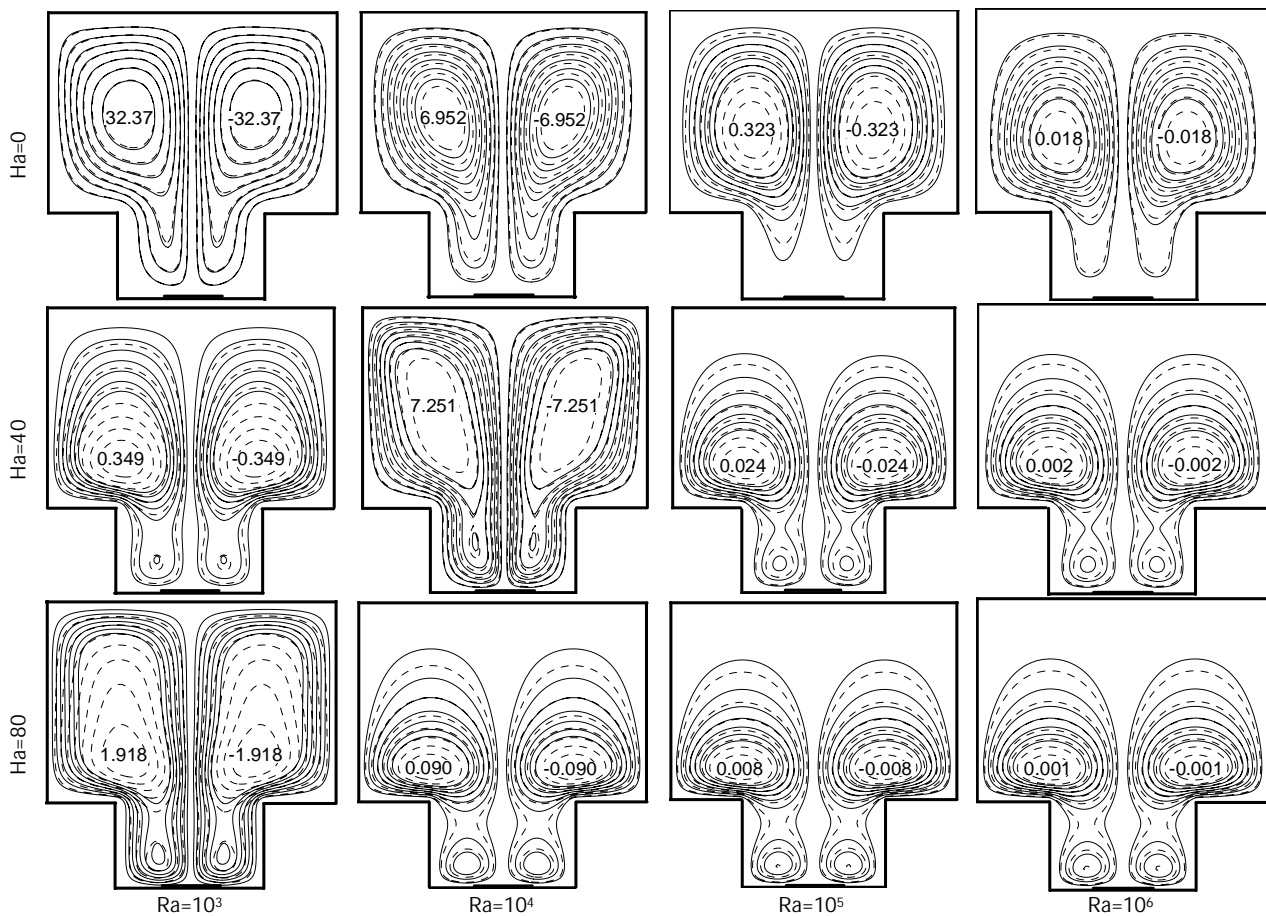
لایه‌های حرارتی به همراه خطوط همدمای موازی و افقی در ناحیه مرکزی محفظه تشکیل می‌شوند. با افزایش عدد ریلی، گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌ها شدیدتر می‌شود و لایه‌های مرزی حرارتی در نزدیکی دیواره‌های گرم و سرد تشکیل می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود، افزایش میدان مغناطیسی، خطوط جریان را وادار می‌کند از حالت پیچیده به سمت خطوط موازی با دیواره‌های محفظه متمایل شوند. به عبارتی با افزایش عدد هارتمن، نیروی لورنتز تقویت شده و بر نیروهای شناوری غلبه کرده و انتقال حرارت هدایتی بر رفتار سیال حاکم می‌شود. در نانوسیال، با افزایش ضریب هدایت حرارتی، سطح دما بالاتر می‌رود. این موضوع باعث کاهش گرادیان دما در نانوسیال نسبت به سیال خالص می‌شود. وقتی از نانوسیال استفاده می‌کنیم، قابلیت و ظرفیت سیال برای انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود. در  $Ha=0$ ، با افزایش عدد ریلی، خطوط همدمای سیال خالص و نانوسیال بر هم منطبق‌تر می‌شوند و اثر نانوسیال کمتر می‌شود. در  $Ha=80$ ، با افزایش عدد ریلی، خطوط همدمای سیال خالص و نانوسیال از هم فاصله می‌گیرند و تاثیر نانوسیال بیشتر می‌شود. بیشترین تاثیر نانوسیال در  $Ha=80$  و  $Ra=10^6$  رخ می‌دهد.

تاثیر کسر حجمی جامد بر نوسلت موضعی منبع گرم به ازای  $Ha=40$ ،  $Ra=10^6$ ،  $\alpha=0^\circ$  در شکل 6 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد کمترین انتقال حرارت در طول منبع گرم در نقطه میانی منبع گرم اتفاق می‌افتد و با فاصله گرفتن از وسط منبع گرم عدد نوسلت افزایش می‌یابد تا جایی که در کناره‌ها به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.

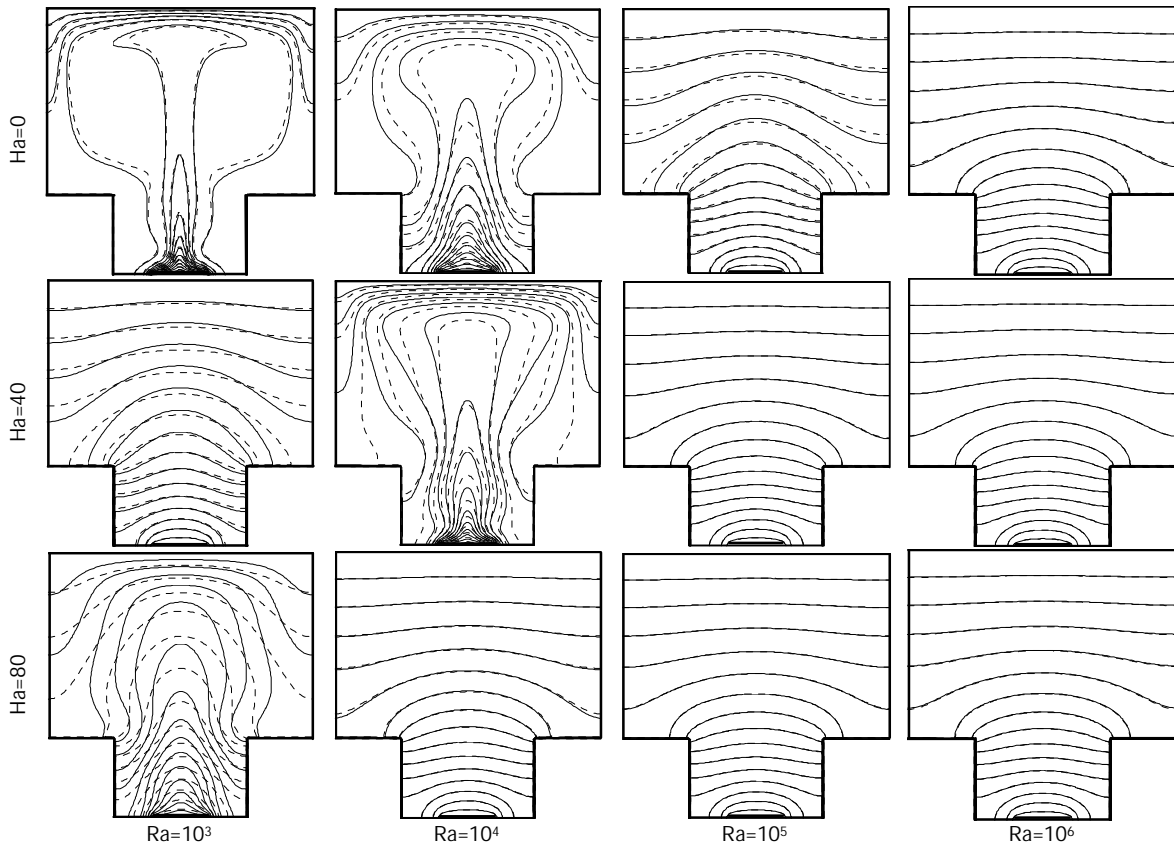
در شکل 4 خطوط جریان در  $Ra=10^3, 10^4, 10^5, 10^6$  و در  $Ha=0, 40, 80$  برای سیال خالص و نانوسیال ( $\phi=0.04$ ) برای این محفظه رسم شده است. اعداد وسط کانتورهای جریان، نشان دهنده ماکزیمم تابع جریان برای نانوسیال می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد میدان جریان برای اعداد ریلی مختلف به صورت گردابه‌های متقارن است. با افزایش عدد ریلی و در نتیجه افزایش نیروهای شناوری، خطوط جریان به سمت دیواره‌ها کشیده می‌شوند. این امر منجر به افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها می‌شود.

همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد هارتمن، خطوط جریان به سمت دیواره پایین کشیده می‌شوند. این امر منجر به ضعیف شدن گردابه‌های متقارن می‌شود که نشان دهنده کاهش سرعت حرکت جریان است. در  $Ha=0$ ، با افزایش عدد ریلی، خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال بر هم منطبق‌تر می‌شوند و اثر نانوسیال کمتر می‌شود. در  $Ha=80$ ، با افزایش عدد ریلی، خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال از هم فاصله می‌گیرند و تاثیر نانو ذرات بیشتر می‌شود. در  $Ha=40$ ،  $Ra=10^5$ ، خطوط جریان سیال و نانوسیال نسبت به دیگر ریلی‌ها بیشتر از همه فاصله گرفته‌اند و این به دلیل تقابل خاصیت شناوری و نیروی لورنتز می‌باشد. در حقیقت افزایش خاصیت شناوری باعث می‌شود، خطوط جریان سیال و نانوسیال بر هم منطبق شوند و افزایش نیروی مغناطیسی باعث فاصله گرفتن خطوط جریان سیال و نانوسیال می‌شود.

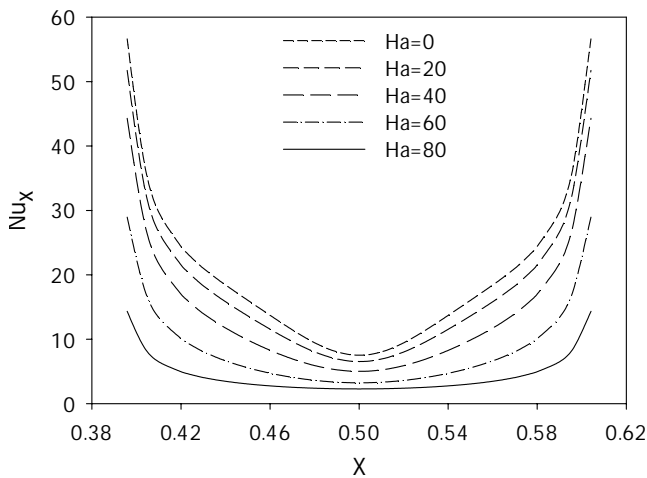
خطوط همدمای در اعداد ریلی و هارتمن مختلف و به ازای  $\alpha=0^\circ$  در شکل 5 نمایش داده شده‌اند. در اعداد ریلی پایین، که هدایت حاکم است،



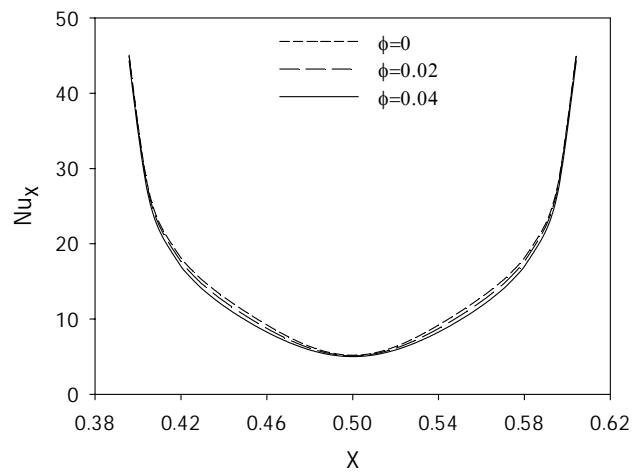
شکل 4 خطوط جریان در ریلی‌ها و هارتمن‌های مختلف برای سیال خالص (—) و نانوسیال  $\phi=0.04$  (---)



شکل 5 خطوط همدمای در ریلی ها و هارتمن های مختلف برای سیال خالص (—) و نانوسیال  $\phi=0.04$  (---)



شکل 7 تاثیر تغییر عدد هارتمن بر نوسلت موضعی ( $Ra=10^6, \phi=0.04$ )



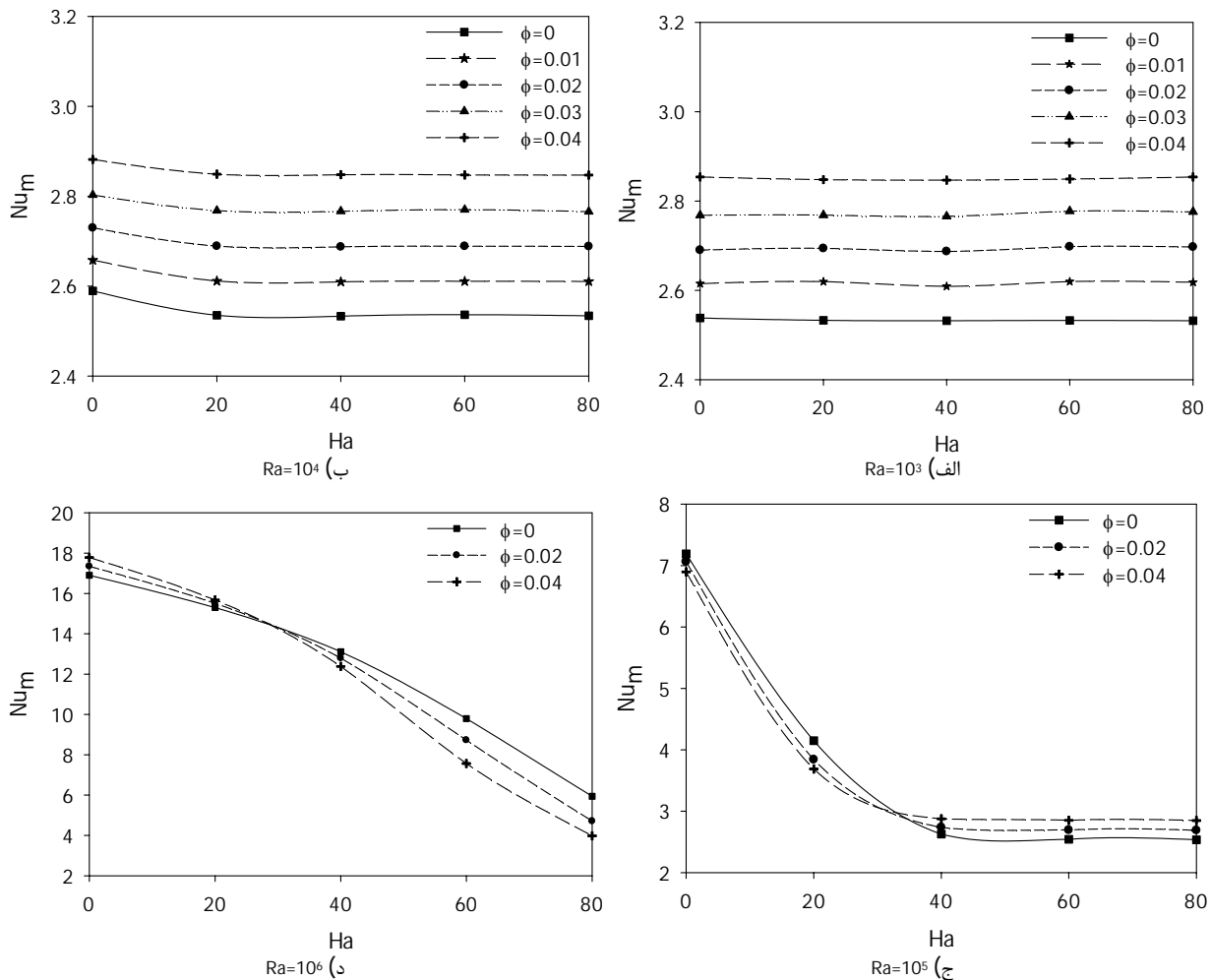
شکل 6 اثر تغییر کسر حجمی نانوذرات مختلف بر نوسلت موضعی ( $Ra=10^6, Ha=40$ )

افزایش عدد هارتمن بر عدد نوسلت افزایش می یابد و در مرکز منبع حرارتی پایین ترین اثر میدان مغناطیسی بر عدد نوسلت را شاهد هستیم. دلیل این امر آن است که در وسط منبع گرم به دلیل صفر شدن مولفه سرعت، اثر میدان مغناطیسی بر نوسلت کاهش می یابد.

در شکل 8 اثر همزمان عدد هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر نوسلت متوسط به ازای  $Ra=10^3, 10^4, 10^5, 10^6$  برای محفظه افقی دیده می شود. در شکل الف و ب، مشاهده می شود که افزایش کسر حجمی جامد باعث افزایش نوسلت متوسط می شود. همچنین در شکل الف افزایش عدد هارتمن تاثیری ناچیز بر عدد نوسلت می گذارد. در شکل ب، افزایش عدد هارتمن از 20 به بالا تاثیر ناچیزی بر نوسلت متوسط دارد. در ضمن هارتمن 20 نیز در کسر حجمی نانوسیال پایین تاثیر گذار است.

دلیل این امر عایق بودن دو طرف منبع گرم می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش کسر حجمی جامد نانوذرات، نوسلت موضعی در طول منبع گرم کاهش یافته است. با توجه به شکل 6 می توان مشاهده کرد که با فاصله گرفتن از کناره های منبع گرم اثر کسر حجمی جامد بر عدد نوسلت افزایش می یابد و سپس با نزدیک شدن به نقطه میانی منبع گرم اثر کسر حجمی نانوذرات کاهش می یابد.

تأثیر میدان مغناطیسی بر نوسلت موضعی به ازای  $Ra=10^6, \phi=0.04$  در شکل 7 نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش اثر میدان مغناطیسی نوسلت موضعی در طول منبع گرم کاهش یافته است. دلیل این امر غلبه نیروی لورنتز بر نیروی شناوری با افزایش میدان مغناطیسی می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد با فاصله گرفتن از مرکز منبع حرارتی اثر



شکل 8 اثر عدد هارتمن و درصد حجمی نانوذرات بر نوسلت متوسط در اعداد ریلی مختلف (الف)  $Ra=10^3$ ، (ب)  $Ra=10^4$ ، (ج)  $Ra=10^5$  و (د)  $Ra=10^6$

میدان مغناطیسی بر کند شدن سرعت جریان و در نتیجه کاهش انتقال حرارت جابجایی است.

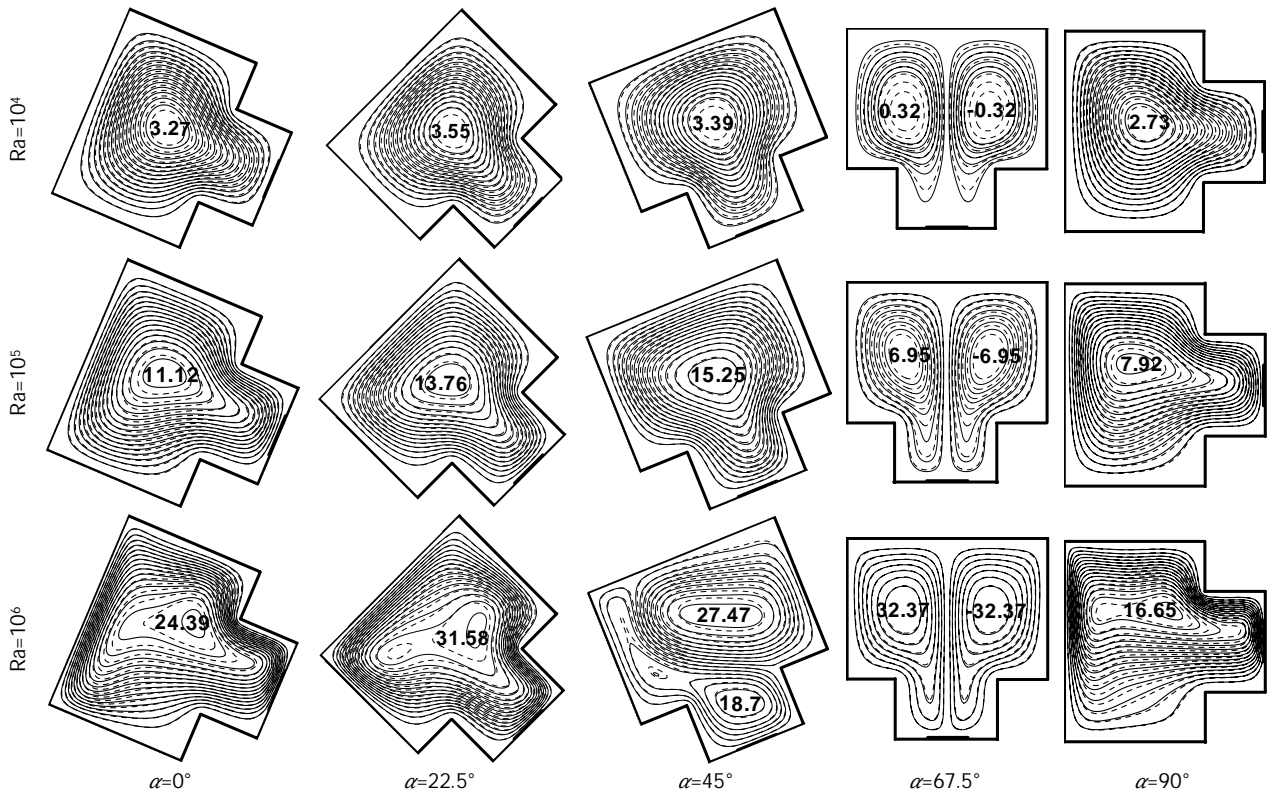
همچنین در جدول 4 مشاهده می‌شود، در  $Ra=10^4$  و در همه اعداد هارتمن، با افزایش درصد حجمی نانوذرات، مقدار نوسلت متوسط، افزایش می‌یابد. ولی در  $Ra=10^5$  و در  $Ha=0$ ، با افزایش نانوذرات، مقدار نوسلت متوسط کاهش می‌یابد و در دیگر هارتمن‌ها، نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین در  $Ra=10^6$  و در هارتمن صفر مقدار نوسلت متوسط افزایش می‌یابد و در دیگر هارتمن‌ها، نوسلت متوسط کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که وقتی از نانوسیال استفاده می‌کنیم، قابلیت و ظرفیت سیال برای انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و از طرفی لزجت نانوسیال با زیاد شدن درصد حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد و جابجایی سیال کندتر می‌شود، ولی در عدد ریلی بالاتر عامل تعیین کننده انتقال حرارت جابجایی می‌باشد و همچنین عدد هارتمن، عاملی برای کاهش انتقال حرارت جابجایی می‌باشد که تقابل این عوامل سبب پیش آمدن حالات فوق شده است.

## 6-2- بررسی اثر چرخش محفظه

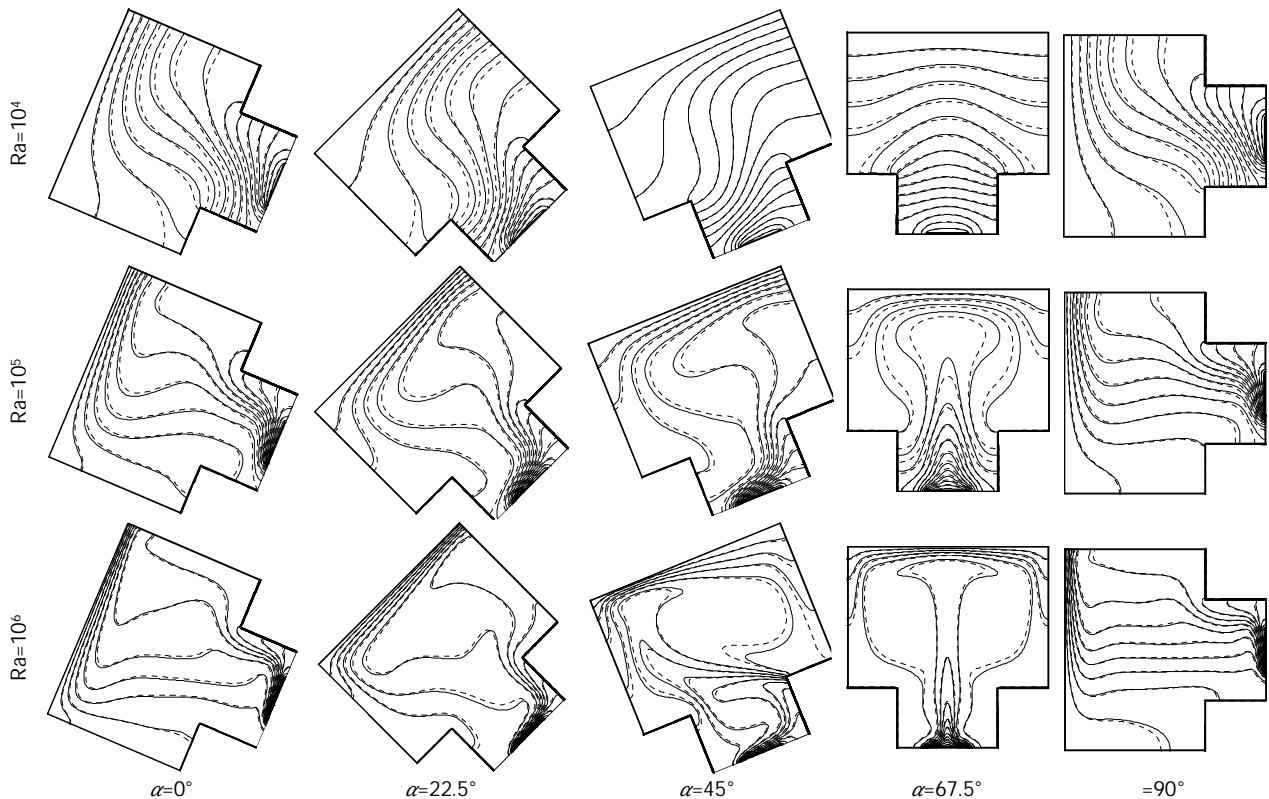
در این قسمت به بررسی اثر چرخش محفظه به ازای  $Ha=0$  و در اعداد ریلی و درصد‌های حجمی مختلف نانوذرات بر انتقال حرارت می‌پردازیم. در شکل 9 خطوط جریان در اعداد ریلی مختلف و تحت زوایای مختلف چرخش محفظه (0, 22/5, 45, 67/5, 90) نشان داده شده است.

در شکل ج، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن 20، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن 40 به بالا، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود. همچنین در کلیه درصد‌های حجمی نانوذرات، افزایش عدد هارتمن تا 20، با توجه به معادله مومنتم (معادله 2 و 3) سبب کاهش انتقال حرارت می‌شود. از  $Ha=40$  به بالا مکانیزم انتقال حرارت از جابجایی به هدایت تغییر کرده و در نتیجه افزایش بیشتر عدد هارتمن به دلیل کوچک شدن سرعت‌ها نمی‌تواند بر نرخ انتقال حرارت تاثیر چندانی داشته باشد. در شکل د، افزایش نانوذرات، تا عدد هارتمن 20، به دلیل غالب بودن انتقال حرارت جابجایی، سبب افزایش نوسلت متوسط می‌شود و در هارتمن 40 به بالا، سبب کاهش نوسلت متوسط می‌شود. بطور کلی از مقایسه 4 شکل 8 دیده می‌شود که تا زمانی که جابجایی حاکم است، افزایش عدد هارتمن می‌تواند باعث کاهش  $Nu_m$  شود. این به دلیل وجود پارامتر سرعت در نیروی لورنتز در معادله ممنتوم است.

در جدول 4 اثر مقادیر مختلف عدد ریلی و عدد هارتمن بر نوسلت متوسط برای درصد نانوذرات متفاوت به‌طور کلی مقایسه شده است. در این جدول  $\Delta\phi\%$  بیانگر درصد افزایش نوسلت متوسط در اثر افزایش کسر حجمی نانوسیال بوده و به صورت  $\Delta\phi\% = \left[ \frac{(Nu_{m,nf} - Nu_{m,f})}{Nu_{m,f}} \times 100 \right]$  تعریف شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد، با افزایش عدد ریلی و با توجه به افزایش نیروهای شناوری، مقدار نوسلت افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عدد هارتمن عدد نوسلت متوسط را کاهش می‌دهد. دلیل این امر اثر



شکل 9 خطوط جریان در زاویه چرخش محفظه و ریلی‌های مختلف در  $Ha=0$  برای سیال خالص (—) و نانوسیال  $\phi=0.04$  (---).



شکل 10 خطوط همدمای در زاویه چرخش و ریلی‌های مختلف در  $Ha=0$  برای سیال خالص (—) و نانوسیال  $\phi=0.04$  (---).

شناوری، خطوط جریان قدرت ورود به پایین محفظه را نداشته است. با افزایش دادن زاویه محفظه، بدلیل وجود خاصیت شناوری و شرایط محفظه، تراکم لایه مرزی هیدرودینامیکی در نزدیکی دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد در  $\alpha=0^\circ$ ، خطوط جریان به صورت متقارن می‌باشد و با تغییر زاویه محفظه، این تقارن از بین می‌رود. در  $Ra=10^4$  و  $\alpha=0^\circ$  تراکم لایه مرزی هیدرودینامیکی در نزدیکی دیواره‌ها کم می‌باشد و در نتیجه ماکزیم تابع جریان در این زاویه پایین می‌باشد و به علت پایین بودن خاصیت



جدول 4 نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد ریلی و عدد هارتمن برای درصد نانوذرات متفاوت.

		نانوذرات متفاوت		
		$0/\phi=$	$0/2\phi=$	$0/\phi=$
$Ra=10^4$	$Ha=0$	2/881	2/729	2/589
	$\% \Delta_{\phi}$	11/27	5/4	0
	$Ha=40$	2/847	2/687	2/533
	$\% \Delta_{\phi}$	12/39	6/07	0
	$Ha=80$	2/8471	2/6882	2/533
	$\% \Delta_{\phi}$	12/4	6/12	0
$Ra=10^5$	$Ha=0$	6/897	7/063	7/192
	$\% \Delta_{\phi}$	-4/1	-1/79	0
	$Ha=40$	2/876	2/736	2/627
	$\% \Delta_{\phi}$	9/47	4/14	0
	$Ha=80$	2/848	2/688	2/535
	$\% \Delta_{\phi}$	12/34	6/03	0
$Ra=10^6$	$Ha=0$	17/772	17/125	16/903
	$\% \Delta_{\phi}$	5/14	1/31	0
	$Ha=40$	12/385	12/795	13/112
	$\% \Delta_{\phi}$	-5/54	-2/41	0
	$Ha=80$	3/978	4/71	5/941
	$\% \Delta_{\phi}$	-33/04	-20/72	0

جدول 5 نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش و عدد ریلی برای درصد نانوذرات متفاوت در  $Ha=0$

		درصد نانوذرات متفاوت در $Ha=0$			
		$\phi=0/04$	$\phi=0$		
$Ra=10^4$	$\alpha=0^\circ$	2/881	0	2/589	0
	$\alpha=22/5^\circ$	4/336	65/89	4/295	4/295
	$\alpha=45^\circ$	4/553	73/27	4/486	4/486
	$\alpha=67/5^\circ$	4/453	68/21	4/355	4/355
	$\alpha=90^\circ$	4/117	53/22	3/967	3/967
	$\% \Delta_{\alpha}$	42/9	4/117	53/22	3/967
$Ra=10^5$	$\alpha=0^\circ$	6/897	0	7/192	0
	$\alpha=22/5^\circ$	10/085	34/12	9/646	9/646
	$\alpha=45^\circ$	10/832	44/39	10/385	10/385
	$\alpha=67/5^\circ$	10/843	45/17	10/441	10/441
	$\alpha=90^\circ$	9/668	29/95	9/346	9/346
	$\% \Delta_{\alpha}$	40/17	9/668	29/95	9/346
$Ra=10^6$	$\alpha=0^\circ$	17/772	0	16/903	0
	$\alpha=22/5^\circ$	14/354	-20/51	13/436	13/436
	$\alpha=45^\circ$	19/934	12/38	18/997	18/997
	$\alpha=67/5^\circ$	21/02	18/5	20/031	20/031
	$\alpha=90^\circ$	19/577	10/33	18/65	18/65
	$\% \Delta_{\alpha}$	10/15	19/577	10/33	18/65

همچنین در  $Ra=10^5$ ، با افزایش نیروی شناوری، خطوط جریان در زاویه صفر درجه به سمت دیواره‌ها کشیده می‌شود، ولی همچنان نسبت به دیگر زوایا، کمترین ماکزیمم تابع جریان را دارد. در زاویه  $22/5$  درجه بیشترین بیشینه تابع جریان را داریم. چگونگی توزیع نیروهای شناوری در جهت‌های X و Y و شکل هندسی محفظه می‌تواند موجب وجود آمدن این تغییرات در میدان جریان شود. در  $Ra=10^6$  و در زاویه صفر درجه، خطوط جریان بدلیل افزایش عدد ریلی، به سمت دیواره‌ها کشیده می‌شوند و در این حالت ماکزیمم تابع جریان را دارا می‌باشد. در زاویه  $22/5$  درجه خطوط جریان به دو قسمت نامتقارن تبدیل می‌شود، که سبب می‌شود مینیمم حالت بیشینه تابع جریان در این زاویه از محفظه اتفاق بیافتد. این حالت ناپایدارترین حالتی

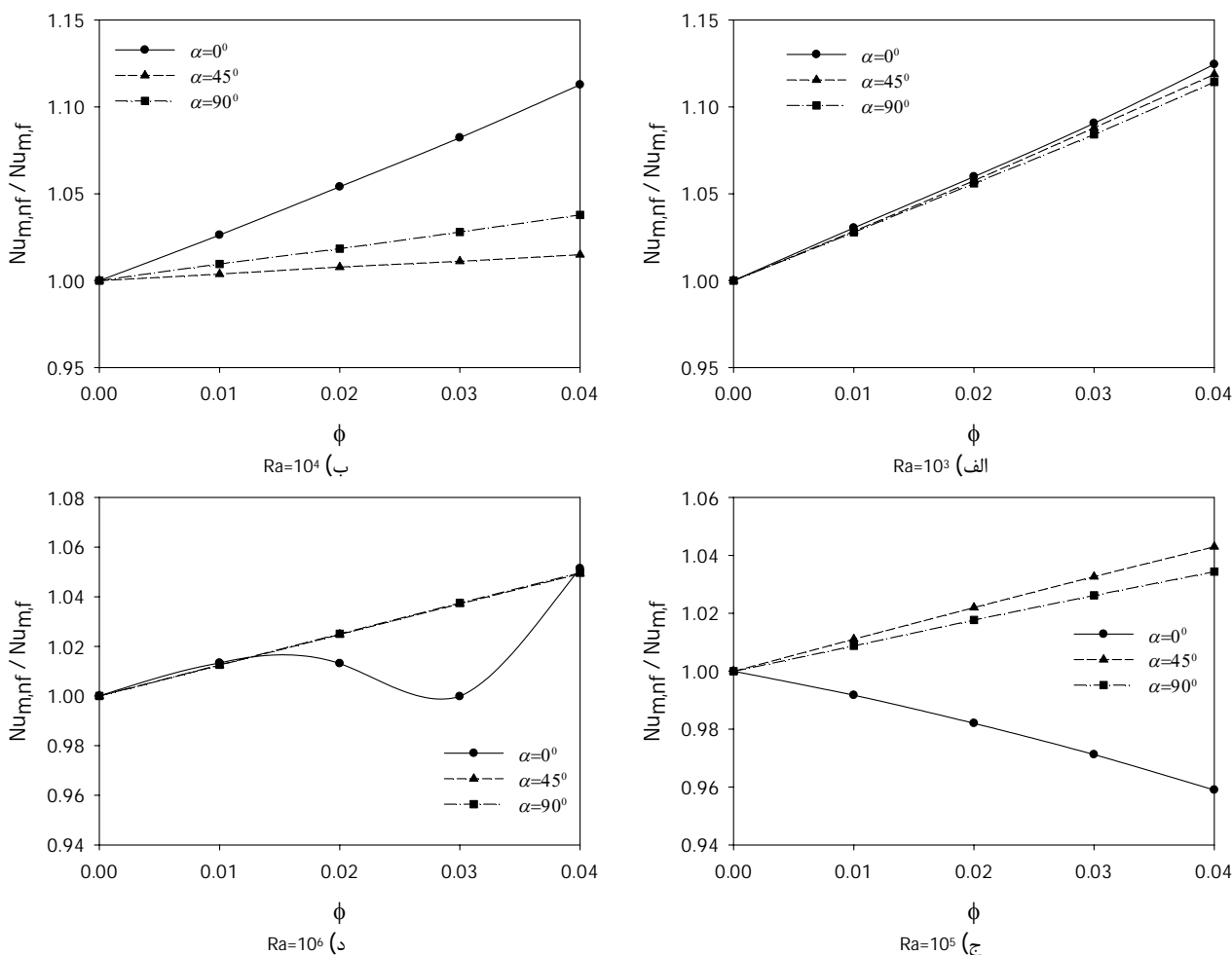
است که بواسطه نحوه قرارگیری منبع گرم و دیواره سرد بوجود می‌آید. همچنین در زاویه  $90$  درجه با توجه به راستای خاصیت شناوری در معادله ممنوم و به سبب گوشه‌ای که در محفظه T شکل وجود دارد، گردابه ضعیف- تری ایجاد شده است و ماکزیمم مقدار تابع جریان نسبت به دیگر زوایا کمتر شده است.

در شکل 10 خطوط همدمای در اعداد ریلی و هارتمن مختلف و تحت زوایای چرخش محفظه (0, 22/5, 45, 67/5, 90) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود. در  $Ra=10^5$ ، با زاویه دادن به محفظه، تا زاویه  $67/5$  درجه، خطوط همدمای به نزدیکی دیواره‌ها حرکت می‌کنند و پیش بینی می‌شود انتقال حرارت افزایش یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد، در  $Ra=10^4$ ، در زاویه چرخش  $22/5$  درجه محفظه، خطوط همدمای سیال خالص و نانوسیال بیشترین تطابق را بر هم دارند. در  $Ra=10^5$  و  $Ra=10^6$ ، در زاویه چرخش  $90$  درجه، خطوط همدمای سیال خالص و نانوسیال بیشترین تطابق را بر هم دارند و نانوذرات کمترین تاثیرگذاری را بر خطوط همدمای انتقال حرارت دارد.

در شکل 11 اثر کسرحجمی نانوذرات بر نسبت نوسلت متوسط نانوسیال به سیال خالص در زوایای چرخش 0, 45, 90 درجه و ریلی‌های مختلف در  $Ha=0$  بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در  $Ra=10^3$ ، نانوذرات تقریباً تاثیر مشابهی بر نوسلت متوسط در زوایای مختلف داشته و با افزایش درصد حجمی نانوذرات، نوسلت افزایش یافته است. با افزایش زاویه محفظه، به دلیل حاکم بودن هدایت،  $Nu_{m,nf}/Nu_{mf}$  به مقدار اندکی کاهش یافته است. در  $Ra=10^4$ ، با افزایش نانوذرات، نوسلت متوسط نسبت به نوسلت متوسط سیال خالص افزایش یافته است. در زاویه صفر درجه بیشترین تاثیرپذیری از نانوسیال را مشاهده می‌کنیم و در زاویه  $45$  درجه کمترین تاثیر نانوذرات بر نوسلت متوسط دیده می‌شود. در  $Ra=10^5$ ، با افزایش نانوذرات، در زوایای  $45$  و  $90$  درجه، نوسلت افزایش می‌یابد و در زاویه صفر درجه، نوسلت متوسط کاهش می‌یابد. در  $Ra=10^6$ ، اثر نانوذرات در زوایای  $45$  و  $90$  درجه تقریباً مشابه می‌باشد و در دو حالت، با افزایش کسر حجمی جامد، نوسلت به یک نسبت افزایش می‌یابد. در زاویه صفر درجه شرایط اندکی متفاوت است و در  $\phi=0.03$ ،  $Nu_{m,nf}/Nu_{mf}$  نسبت به دیگر کسر حجمی نانوذرات کمترین مقدار را دارد.

در جدول 5 عدد نوسلت متوسط به ازای  $Ra=10^4, 10^5, 10^6$  و  $\alpha=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$  نمایش داده شده است. در این جدول  $\% \Delta_{\alpha}$  بیانگر درصد افزایش نوسلت متوسط در اثر اعمال زاویه چرخش محفظه بوده و به صورت  $(\% \Delta_{\alpha} = [(Nu_m - Nu_{m,\alpha=0^\circ}) / Nu_{m,\alpha=0^\circ}] \times 100)$  تعریف شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد، در  $Ra=10^4$ ، بیشترین انتقال حرارت برای سیال خالص و نانوسیال در زاویه  $45$  درجه رخ می‌دهد و زاویه صفر درجه، کمترین انتقال حرارت را دارا می‌باشد. در  $Ra=10^5$  و  $Ra=10^6$ ، بیشترین انتقال حرارت در زاویه  $67/5$  درجه اتفاق می‌دهد. در  $Ra=10^5$  کمترین نوسلت در زاویه صفر درجه و در  $Ra=10^6$ ، در زاویه  $22/5$  درجه می‌باشد.

تنها حالتی که درصد افزایش نوسلت متوسط در اثر اعمال زاویه منفی می‌شود، در  $Ra=10^6$  و در زاویه  $22/5$  درجه می‌باشد که در سیال خالص تا 20 درصد نوسلت کاهش یافته است و بیشترین درصد افزایش نوسلت متوسط در اثر اعمال، در  $Ra=10^4$  و در زاویه  $45$  درجه می‌باشد که در سیال خالص تا 73 درصد نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. دلیل این نتایج، شرایط فیزیکی مسئله در زوایای مختلف و وجود خاصیت شناوری می‌باشد.



شکل 11 اثر کسرحجمی نانوذرات بر نوسلت متوسط در زوایای چرخش و ریلی های مختلف الف (Ra=10<sup>3</sup>، ب (Ra=10<sup>4</sup>، ج (Ra=10<sup>5</sup> و د (Ra=10<sup>6</sup>).

### 7- نتیجه گیری

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد داخل محفظه T شکل مورب پر شده از نانوسیال، تحت میدان مغناطیسی بررسی شد. معادلات حاکم توسط الگوریتم سیمپل حل شد. عدد هارتمن، عدد ریلی، و زاویه محفظه نسبت به افق در کسرهای مختلف نانوذرات تغییر داده شد. نتایجی که از این مقاله می توان گرفت به صورت زیر می باشد:

1. اثر میدان مغناطیسی بر نوسلت متوسط در ریلی های بالا بیشتر است.
2. در Ra=10<sup>5</sup>، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن 20، سبب کاهش نوسلت متوسط می شود و از هارتمن 40 به بالا، سبب افزایش نوسلت متوسط می شود درحالی که در Ra=10<sup>6</sup>، افزایش نانوسیال، تا عدد هارتمن 20، سبب افزایش نوسلت متوسط می شود و از هارتمن 40 به بالا، سبب کاهش نوسلت متوسط می شود.
3. بیشترین انتقال حرارت در اعداد ریلی 10<sup>5</sup> و 10<sup>6</sup>، در زاویه 67/5 درجه رخ می دهد.
4. کمترین انتقال حرارت در اعداد ریلی 10<sup>5</sup> و 10<sup>6</sup>، به ترتیب در زاویه صفر و 22/5 درجه رخ می دهد.

### 8- فهرست علائم

$c_p$	گرمای ویژه (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$d_s$	قطر نانوذرات جامد (nm)
$d_f$	اندازه مولکولی سیال مینا ( $d_f = 2\text{Å}$ )
$g$	شتاب جاذبه زمین (ms <sup>-2</sup> )
$h$	ارتفاع پایه محفظه (m)
$H$	ارتفاع بی بعد پایه محفظه (m)
$Ha$	عدد هارتمن ( $Ha = B_0 L \sqrt{\sigma_{nf} / \rho_{nf} \nu_f}$ )
$K$	ضریب هدایت گرمایی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$k_b$	ثابت بولتزمن ( $k_b = 1.3807 \times 10^{-23}$ JK <sup>-1</sup> )
$l_0$	طول منبع حرارتی (m)
$L_0$	طول بی بعد منبع حرارتی (m)
$L$	طول محفظه (m)
$Nu$	عدد نوسلت موضعی ( $Nu = hL/k$ )
$p$	فشار سیال (Pa)
$P$	فشار بدون بعد ( $P = p / \rho v_0^2$ )
$Pr$	عدد پرانتل ( $Pr = \nu / \alpha$ )
$Pe$	عدد پکلت ( $Pe = u_s d_s / \alpha$ )
$Ra$	عدد ریلی ( $Ra = g \beta L^3 (T_h - T_c) / \nu_f \alpha_f$ )
$T$	دما (K)
$u, v$	مولفه بردار سرعت در راستای x و y (ms <sup>-1</sup> )
$U, V$	مولفه بدون بعد سرعت

$B_0$  میدان مغناطیسی ثابت (T)

$c$  ثابت تجربی

- [9] S. H. Tasnim, S. Mahmud, Laminar free convection inside an inclined L-shaped enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 936-942, 2006.
- [10] M. Rahman, M. A. R. Sharif, Numerical study of laminar natural convection in inclined rectangular enclosures of various aspect ratios, *J Numerical Heat Transfer*, Vol. 44, pp. 355-373, 2003.
- [11] S. M. Aminossadati, B. Ghasemi, The effects of orientation of an Inclined enclosure on laminar natural convection, *Heat and Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 43-49, 2005.
- [12] S. Kumar, S. K. Prasad, J. Banerjee, Analysis of flow and thermal field in nanofluid using a single phase thermal dispersion model, *Appl. Math. Model.* Vol. 34, pp. 573-592, 2010.
- [13] S. M. Aminossadati, B. Ghasemi, Natural convection cooling of a localized heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure, *Eur. J. Mech. B Fluids*, Vol. 28, pp. 630-640, 2009.
- [14] M. Mahmoodi, S. M. Hashemi, Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, pp. 76-89, 2012.
- [15] B. Xu, B. Q. Li, D. E. Stock, N. Nithyadevi, An experimental study of thermally induced convection of molten gallium in magnetic fields, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2009-2019, 2006.
- [16] N. Rudraiah, R. M. Barron, M. Venkatachalappa, C. K. Subbaraya, Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure, *Int. J. Engng Sci.*, Vol. 33, No. 8, pp. 1075-84, 1995.
- [17] M. A. A. Hamad, I. Pop, A. I. M. Ismail, Magnetic field effects on free convection flow of a nanofluid past a vertical semi-infinite flat plate, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Vol. 12, pp. 1338-1346, 2011.
- [18] A. Gavili, F. Zabihi, T. D. Isfahani, J. Sabbaghzadeh, The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp. 94-98, 2012.
- [19] A. H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, F. Talebi, MHD natural convection and entropy generation in a trapezoidal enclosure using Cu-water nanofluid, *Computers & Fluids*, Vol. 72, pp. 46-62, 2013.
- [20] S. M. Aminossadati, B. Ghasemi, Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, pp. 630-640, 2009.
- [21] H. E. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A. Dasgupta, N. Dasgupta, S. K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, *Pramana, J. Phys.* Vol. 65, pp. 863-869, 2005.
- [22] A. K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 48, pp. 391-400, 2009.
- [23] S. V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, D. C. Washington, 1980.
- [24] K. Khanafer, K. Vafi, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639-3953, 2003.
- [25] G. Barakos, E. Mitoulis, Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 18, pp. 695-719, 1994.
- [26] N. C. Markatos, K. A. Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 772-775, 1984.
- [27] M. Pirmohammadi, M. Ghassemi, Effect of magnetic field on convection heat transfer inside a tilted square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 776-780, 2009.
- $u_s$  حرکت براونی سرعت ( $ms^{-1}$ )  
 $\alpha$  و  $\gamma$  مختصات کارتزین (m)  
 $\beta$  و  $\gamma$  مختصات بدون بعد  
**علایم یونانی**  
 $\alpha$  ضریب پخش حرارتی ( $m^2s^{-1}$ )  
 $\beta$  ضریب انبساط گرمایی ( $1/K$ )  
 $\mu$  لزجت دینامیکی (Pa.s)  
 $\rho$  چگالی ( $kgm^{-3}$ )  
 $\sigma$  ضریب هدایت الکتریکی ( $\mu s.cm^{-1}$ )  
 $\nu$  لزجت سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )  
 $\theta$  پروفیل دمای بدون بعد  
 $\varphi$  نسبت حجمی ذرات جامد  
**زیر نویس ها**  
c سرد  
eff موثر  
f سیال  
h گرم  
m متوسط  
nf نانو سیال  
s نانوذرات

## 9- مراجع

- [1] T. Saitoh, K. Hirose, High-accuracy bench mark solutions to natural convection in a square cavity, *Comput Mech*, Vol. 4, pp. 417-427, 1989.
- [2] G. De vahl davise, Natural convection of air in a square cavity: A bench mark numerical solution, *Int. J. Numerical Method*, Vol. 3, pp. 249-264, 1983.
- [3] H. Nakamura, Y. Asoko, T. Naitou, Heat transfer by free convection between two parallel flat plates, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 39-58, 1982.
- [4] A. Malekpour, B. Ghasemi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled triangular enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 10-21, 2013. (In Persian)
- [5] S. Karimi, B. Ghasemi, Water-alumina natural convection heat transfer in an inclined L shape cavity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 133-144, 2013. (In Persian)
- [6] M. El alami, M. Najam, E. Semma, A. Oubarra, F. Penot, Chimney effect in a "T" form cavity with heated isothermal blocks: The blocks height effect, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, pp. 3181-3191, 2004.
- [7] A. Mezrhab, S. Amraqui, C. Abid, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, pp. 83-92, 2010.
- [8] G. Lock, J. Sh. Fu, Natural convection in the inclined cranked thermosyphon, *J Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 167-172, 1993.